第 40 卷　第 3 期　　天　文　学　进　展　　Vol. 40,　No. 3
2022 年 9 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Sept., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.03.01

银河系卫星星系搜寻和物理性质研究进展

潘治政[1,2]，杨　超[1,2]，房　敏[1,2]，郑宪忠[1,2]

(1. 中国科学院 紫金山天文台 南极天文与射电天文研究部，南京 210033； 2. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院，合肥 230026)

摘要： 近十几年来，银河系卫星星系搜寻取得了重要进展。截至 2021 年，已发现卫星星系 60 余个，并且该数目随着下一代图像巡天的开展还将继续增加。全面普查卫星星系族群不仅对准确刻画近邻宇宙结构具有重要意义，还能用来检验星系形成模型和暗物质性质。卫星星系作为星系族群的重要组成部分，对其物理性质的研究也是理解星系形成与演化不可或缺的一环。首先介绍了近十几年来卫星星系的搜寻进展，对卫星星系物理性质做了总结，最后展望下一代巡天对该领域带来的机遇。

关　键　词： 银河系；矮星系；图像巡天

中图分类号： P152, P156　　　**文献标识码：** A

1　引　言

银河系是本星系群第二大的星系，位力半径约为 300 kpc[1]。观测发现，在银河系位力半径之内还分布着许多件星系，通常称之为银河系的卫星星系 (以下简称“卫星星系”)。其中，最为人们所熟知的是位于南天区的大麦哲伦云 (Large Magellanic Cloud, LMC) 和小麦哲伦云 (Small Magellanic Cloud, SMC)，它们也是已知最大的两个卫星星系。目前已发现的绝大多数卫星星系光度与球状星团相当，但是它们的恒星动力学、恒星形成历史、恒星分布尺度等物理性质与球状星团相差很大[2, 3]。

研究卫星星系具有十分重要的科学意义。由于卫星星系在银河系引力势井中运动，因此利用大样本卫星星系的运动学特性，并结合模型，就可以估算银河系的动力学质量[4–6]。另外，冷暗物质模型[7]在描述宇宙大尺度结构的形成与演化方面取得了非凡的成功，但在预言小尺度结构的性质时遭遇了一系列的困难。例如，冷暗物质模型预言在银河系所处的暗物质

收稿日期： 2021-12-02；　**修回日期：** 2022-01-19

资助项目： 国家自然科学基金 (11773076, 12073078, 12173088)；国家重点研发计划 (2017YFA0402703)；青海省重大科技专项 (2019-ZJ-A10)

通讯作者： 潘治政，panzz@pmo.ac.cn

晕中应该有上千个子暗晕可以形成恒星[8, 9]，但目前已发现的银河系卫星星系仅有 60 余个，比冷暗物质模型的预言要少一两个量级，该问题被称为“失踪的卫星星系问题”[10−12]。也有学者认为，并不存在“失踪的卫星星系问题”，而是宇宙再电离之后，紫外背景光子的加热使得气体无法有效在部分暗晕中冷却[13, 14]；因此，一些暗晕内的恒星形成效率极低，使其过于暗弱以致难以观测到。受限于当前的观测水平，天文学家对卫星星系的普查尚未完备，预期将来还会发现更多的卫星星系。因此，对卫星星系做全面普查，能为星系形成理论研究提供重要观测约束。另外，动力学研究表明卫星星系的质量由不可见物质 (暗物质) 所主导[2, 15]，因此，卫星星系是天然的“暗物质实验室”，为探测暗物质粒子湮灭信号、揭示暗物质本质以及它们在暗晕中的分布情况提供了绝佳研究对象[16−19]。再者，卫星星系是目前可观测的最小星系。它们对宇宙恒星质量总量的贡献虽然不大，但是数目远远多于大星系，是星系族群的重要组成部分。它们也是可以分辨单颗恒星的星系，是研究极小质量暗晕中恒星如何形成的理想对象；由于恒星反馈影响显著，卫星星系的恒星是极贫金属的，可能是第一代恒星的遗迹[20, 21]。研究这些小星系的物理性质及其演化历史，有助于建立完整的星系形成演化图像[22, 23]。

近十几年来，随着大规模数字化图像巡天项目的陆续开展，天文学研究进入了大数据时代，卫星星系的搜寻也取得了突破性进展，如图 1 所示。其中，斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS[24]) 和暗能量巡天 (Dark Energy Survey, DES[25]) 发挥了至关重要的作用。2005 年，研究人员第一次利用 SDSS 数据发现了一个新的卫星星系候选者，后利用光谱观测证实了它是一个卫星星系[26]。之后的工作利用大天区图像巡天数据进行系统搜寻，陆续发现新的卫星星系和候选者 50 余个。其中，某些卫星星系有非常独特的性质，甚至革新了人们对星系的认知。例如，Torrealba 等人[27]在银道面附近发现了一个极为特殊的卫星星系 Antlia 2，它的尺度与大麦哲伦云相当，但面亮度比超疏散星系 (ultra diffuse galaxy) 还要低，是目前已知面亮度最低的星系。

在这样的背景下，本文对近十几年来卫星星系的搜寻和物理性质研究进展进行详细介绍。第 2 章介绍卫星星系搜寻进展；第 3 章介绍搜寻方法；第 4 章介绍卫星星系的物理性质；第 5 章展望下一代图像巡天对该领域的拓展；第 6 章是全文总结。

2 卫星星系搜寻进展

在 SDSS 之前，人们只发现了 11 个卫星星系 (也称为“经典卫星星系”)。在观测特征上，一个典型的卫星星系在天球上分布于几十到几百平方角分的区域内。另外，卫星星系的恒星在颜色-星等图上与贫金属、年老球状星团恒星的分布特征相似。近年来，SDSS 和 DES 等大规模数字化图像巡天项目的成功开展，为搜寻卫星星系提供了有力的数据支持。截至 2021 年，天文学家已找到卫星星系和候选者 60 多个，其空间分布见图 2，具体信息见表 1。以下将介绍基于不同巡天项目的卫星星系搜寻进展。

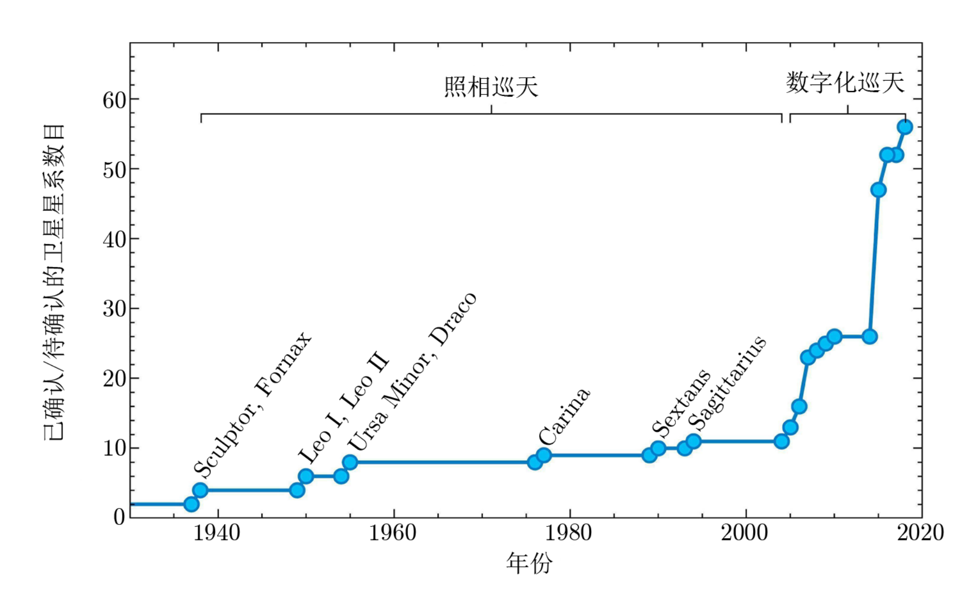
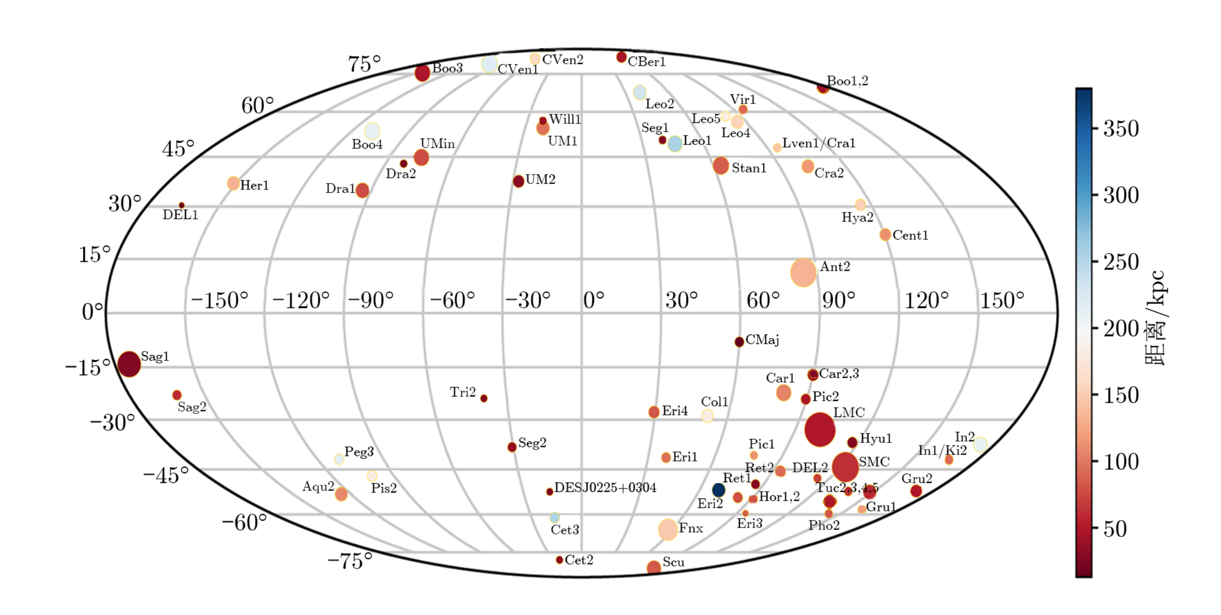


图 1　已发现的银河系卫星星系总数目随年份增加的趋势[3]



注：该图展示的是银道坐标系下，卫星星系的分布情况。图中标识的大小表征卫星星系的半径，颜色表征卫星星系到太阳系的距离。

图 2　已发现的银河系卫星星系和候选者的分布情况

表 1 已知卫星星系或候选者

名称	赤经 /(°)	赤纬 /(°)	距离 /kpc	尺寸 /pc	M_V /mag	光谱证认	参考文献
Antlia II	143.886 8	−36.767 3	132	2 301	−9.03	有	[27]
Aquarius II	338.481 3	−9.327 4	108	125	−4.4	有	[45]
Boötes I	210.020 0	14.513 5	66	160	−6.02	有	[57]
Boötes II	209.514 1	12.855 3	42	33	−2.94	有	[57]
Boötes III	209.3	26.8	47	289	−5.75	无	[58]
Boötes IV	233.689	43.726	209	277	−4.53	无	[49]
Canes Venatici I	202.009 1	33.552 1	218	338	−8.80	有	[57]
Canes Venatici II	194.292 7	34.322 6	160	55	−5.17	有	[57]
Carina	100.406 5	−50.959 3	105	248	−9.43	有	[57]
Carina II	114.106 6	−57.999 1	36	77	−4.5	有	[53]
Carina III	114.629 8	−57.899 7	28	20	−2.4	有	[53]
Centaurus I	189.585	−40.902	116	76	−5.55	无	[54]
Cetus II	19.47	−17.42	30	17	0.0	无	[37]
Cetus III	31.331	−4.270	251	44	−2.5	无	[48]
Columba I	82.86	−28.01	183	98	−4.2	无	[59]
Coma Berenices	186.745 4	23.906 9	44	57	−4.38	有	[57]
Crater II	177.310	−18.413	117	1 066	−8.2	有	[46]
DES J0225+0304	36.426 7	3.069 5	24	12	−1.1	无	[60]
Draco	260.068 4	57.918 5	76	180	−8.71	有	[57]
Draco II	238.174	64.579	22	17	−0.8	有	[61]
Eridanus I	66.185 3	−21.187 6	90	17	−4.93	有	[57]
Eridanus II	56.092 5	−43.532 9	380	158	−7.21	有	[57]
Eridanus IV	76.438	−9.515	77	75	−4.7	无	[62]
Fornax	39.958 3	−34.499 7	147	707	−13.46	有	[57]
Grus I	344.179 7	−50.18	120	21	−3.47	有	[57]
Grus II	331.02	−46.44	53	92	−3.9	无	[37]
Hercules	247.772 2	12.785 2	132	120	−5.83	有	[57]
Horologium I	43.881 3	−54.116	79	31	−3.55	有	[57]
Horologium II	49.107 7	−50.048 6	78	33	−2.6	无	[42]
Hydra II	185.425 1	−31.986 0	151	58	−4.60	有	[57]
Hydrus I	37.389	−79.308 9	28	53	−4.71	有	[52]
Indus II	309.72	−46.16	214	180	−4.3	无	[37]
Kim 2	317.202 0	−51.167 1	100	12	−3.32	无	[57]
Laevens 1	174.066 8	−10.877 2	145	20	−4.80	有	[57]
LMC	80.893 8	−69.756 1	50	473 5	−18.12	有	[64]
Leo I	152.114 6	12.305 9	254	226	−11.78	有	[57]
Leo II	168.362 7	22.152 9	233	165	−9.74	有	[57]
Leo IV	173.240 5	−0.545 3	154	104	−4.99	有	[57]
Leo V	172.785 7	2.219 4	178	39	−4.40	有	[57]

(续表)

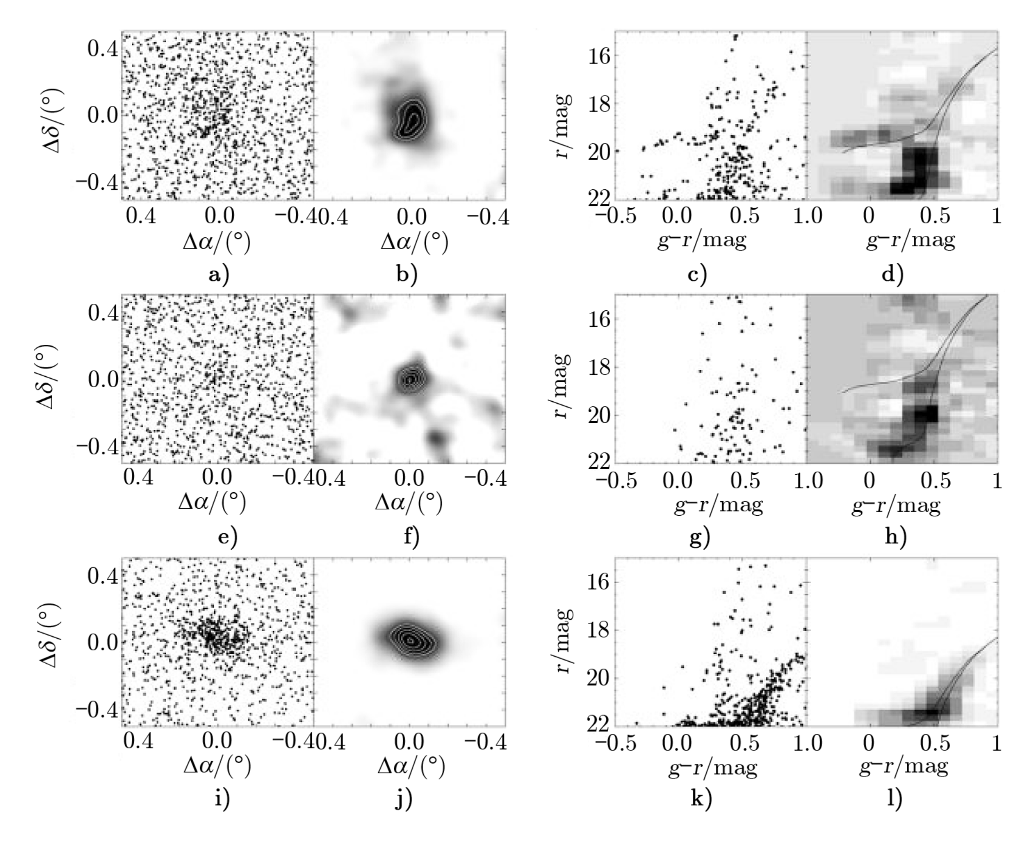
名称	赤经 /(°)	赤纬 /(°)	距离 /kpc	尺寸 /pc	M_V /mag	光谱证认	参考文献
Pegasus III	336.102	5.405	215	42	−3.4	有	[63]
Phoenix II	354.996	−54.411 5	83	21	−3.30	有	[57]
Pictor I	70.949	−50.285 4	114	18	−3.45	无	[57]
Pictor II	101.180	−59.897	46	47	−3.2	无	[51]
Pisces II	344.634 5	5.952 6	182	48	−4.22	无	[57]
Reticulum II	53.920 3	−54.051 3	30	31	−3.88	有	[57]
Reticulum III	56.36	−60.45	92	64	−3.3	无	[37]
Sagittarius	283.831 3	−30.545 3	26	156 5	−13.5	有	[2]
Sagittarius II	298.164 7	−22.065 1	69	32	−5.2	无	[65]
Sculptor	15.018 3	−33.718 6	84	223	−10.82	有	[66]
Segue 1	151.750 4	16.075 6	23	20	−1.3	有	[57]
Segue 2	34.822 6	20.162 4	35	35	−1.86	有	[57]
Sextans	153.262 8	−1.613 3	86	345	−8.72	有	[57]
SMC	13.186 7	−72.828 6	62	272 8	−17.18	有	[67]
Triangulum II	33.325 2	36.170 2	30	13	−1.60	有	[57]
Tucana II	342.979 6	−58.568 9	58	165	−3.8	有	[64]
Tucana III	359.15	−59.60	25	44	−2.4	有	[37]
Tucana IV	0.73	−60.85	48	128	−3.5	无	[37]
Tucana V	354.35	−63.27	55	16	−1.6	无	[37]
Ursa Major I	158.770 6	51.947 9	97	171	−5.12	有	[57]
Ursa Major II	132.872 6	63.133 5	32	85	−4.25	有	[57]
Ursa Minor	227.242 0	67.222 1	76	272	−9.03	有	[57]
Virgo I	180.038	−0.681	91	30	−0.33	无	[48]
Willman 1	162.343 6	51.050 1	38	20	−2.53	有	[57]

2.1 SDSS 卫星星系搜寻

SDSS 是利用位于新墨西哥州阿帕奇山顶天文台的 2.5 m 口径望远镜开展的巡天项目。它覆盖了上万平方度的天区，提供了光学 u, g, r, i, z 共 5 个波段的测光数据，以及上百万条天体光谱。SDSS 从 2000 年开始巡天，r 波段极限星等为 22.2 mag[28]。通过模拟，Willman 等人[29]预言利用 SDSS 数据可以找到一批新的卫星星系，面亮度比当时已知最暗的 Sextans 还要低 $0.5\sim3.9\ \mathrm{mag\cdot arcsec^{-2}}$。2005 年，Willman 等人[30] 利用 SDSS 数据找到了一个卫星星系候选者——SDSS J1049+5103，后面的文献称这个源为 Wil 1。Wil 1 的光度、颜色-星等图等性质与银河系球状星团十分相似，但是半光半径比同光度的球状星团要大 $4\sim5$ 倍。Willman 等人当时并不确定这个源是一个卫星星系。直到 2007 年，Martin 等人[26] 利用凯克望远镜对 Wil 1 和几个卫星星系候选者进行了高分辨率的光谱观测，研究了这些源恒星的金属丰度分布。结果显示，Wil 1 恒星的金属丰度弥散度显著大于一般的球状星团，说明它

不太可能形成于单一星暴，从而证实了 Wil 1 是一个卫星星系。

随着 SDSS 巡天的推进，陆续有新的卫星星系被发现。2006 年，Zucker 等人[31, 32]发现两个新的卫星星系。其中一个源 (Ursa Major) 显得非常特别，它有几个恒星聚集区，暗示着这个星系正处在潮汐瓦解阶段。Belokurov 等人[33] 系统搜寻了 SDSS DR5 约 8 000 平方度的天区，又发现了 5 个卫星星系，部分星系见图 3。截至 2018 年，科学家利用 SDSS 数据共发现了 17 个新的卫星星系或候选者[34]，大大拓展了人们对卫星星系族群的认知。在新找到的这些源中，部分暗弱的候选者需要利用其他的望远镜进行后随测光或光谱观测加以证认。例如前文提到的 Wil 1，是通过凯克望远镜进行高分辨率光谱观测后才最终确认其为一颗卫星星系，类似的例子还有 Segue 2[35]。



注：a)—d) Bootes，$M_{\rm V}=-6.3$ mag, $d=66$ kpc；e)—h) Bootes II，$M_{\rm V}=-2.3$ mag, $d=42$ kpc；i)—l) Canes Venatici，$M_{\rm V}=-8.6$ mag, $d=218$ kpc。a), e), i) 卫星星系所在区域 1° × 1° 天区恒星的分布；b), f), j) 平滑化之后的恒星分布密度图；c), g), k) 恒星颜色-星等图；d), h), l) 颜色-星等图叠加上星族年龄为 13.0 Ga、金属丰度为 [Fe/H]=−2.3 的等时线。

图 3 SDSS 巡天找到的一些卫星星系[41]

2.2 DES 卫星星系搜寻

SDSS 主要的观测区域在北天区。在南天区，DES 巡天在卫星星系搜寻方面发挥了重要作用。DES 巡天覆盖南银冠附近约 5 000 平方度的天区，观测 g, r, i, z, Y 共 5 个波段，r

波段观测比 SDSS 大 2 mag，因此能够搜寻更为暗弱的卫星星系。2015 年，利用 DES 第一年观测的数据，Bechtol 等人[36]在 1 800 平方度天区里系统搜寻卫星星系，发现了 8 个新的候选者；同年，Drlica-Wagner 等人[37]利用 DES 第二批观测数据，又新发现了 8 个候选者。有意思的是，这些新发现的候选者中，有相当大比例的源聚集在大麦哲伦云附近。对于这种聚集现象，天文学家提出了两种可能的解释。第一种解释是大麦哲伦云一开始并不是银河系的卫星星系，而是属于银河系位力半径之外的一个星系系统[38]；这个系统后来被银河系吸积并且潮汐瓦解，瓦解出来的物质形成了大麦哲伦云以及它周围的矮星系。一些数值模拟的研究支持此类说法[39, 40]。第二种解释认为，大麦哲伦云作为银河系最大的卫星星系，它的引力势井相对较深，可以俘获周围更小的星系，久而久之便形成一个以大麦哲伦云为中心的子引力束缚系统[37]。

不同的搜寻方法对卫星星系信号的探测灵敏度不同 (如有些方法对疏散星系的探测不敏感)，因此最终搜寻结果十分依赖于所使用的方法[41]。尽管 DES 项目组团队已经系统搜寻过 DES 天区，其他的研究者通过继续挖掘 DES 数据，又发现了一些卫星星系的候选者。Kim 和 Jerjen[42]提出新方法，重新对 DES 第一年的数据进行了系统搜寻。除了能证认 Bechtol 等人已发现的那些卫星星系以外，他们又发现了一个新的候选者 Hor II；Luque 等人[43]对 DES 第一年的数据进行了深度挖掘，又发现了一个很暗的卫星星系候选者 DES 1。同样，这些 DES 找到的卫星星系候选者需要做后随光谱证认。截至 2021 年，这 18 个候选者中有大约一半的源已被光谱确认为卫星星系。

2.3 其他图像巡天项目的卫星星系搜寻

SDSS 和 DES 在卫星星系搜寻工作中发挥了十分重要的作用，近十几年来新发现的源大多来自这两个巡天。基于这两个巡天在搜寻卫星星系方面的成功经验，研究人员也利用其他的图像巡天数据来开展搜寻工作。下面对其他图像巡天项目的卫星星系搜寻做简单介绍。

2.3.1 Pan-STARRS1

Pan-STARRS1 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System 1) 是利用一架 1.8 m 口径望远镜开展的多波段巡天项目。它覆盖全天区 75% 的区域，r 波段极限星等与 SDSS 相当。相比 SDSS 和 DES，Pan-STARRS1 的优势在于其更大的天区覆盖范围。基于 Pan-STARRS1 数据，Laevens 等人[44] 找到了 4 个新的卫星星系。

2.3.2 ATLAS

ATLAS 巡天是欧洲南方天文台的一个项目，利用 2.6 m 口径 VST 望远镜在南银冠天区开展 u, g, r, i, z 共 5 个波段巡天，巡天面积约为 5 000 平方度，深度与 SDSS 相当。2015 年，Torrealba 等人[45, 46]发现了 2 个卫星星系。其中的一个 (Crater 2) 尺寸很大，在当时仅次于大小麦哲伦云和 Sgr 矮星系。

2.3.3 HSC-SSP

HSC-SSP (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program) 巡天是利用日本 Subaru 望远镜开展的一个巡天项目。其中的 HSC-Wide 计划观测 1 400 平方度的天区，巡天深度比 DES 深两个星等，因此可以探测极其暗弱的卫星星系信号。目前这个项目还在进行当中。

Homma 等人[47−49]利用 HSC-SSP 前期观测的数据，已经搜寻到 3 个新的卫星星系候选者。相比 DES 和 SDSS 的源，HSC-SSP 新探测到的这几个源要么是距离更远，要么是光度更小，说明银河系周围还有相当一部分卫星星系未被发现。到项目结束，预期 HSC-SSP 还能再发现 5 或 6 个卫星星系。

2.3.4 DECam

大规模多波段巡天项目 DES 是利用 4 m 口径 Blanco 望远镜的 DECam 相机开展的。天文学家利用这台设备也开展了一系列中小规模图像巡天项目，例如 Survey of the Magellanic Stellar History (SMSH)、Magellanic Satellites Survey (MagLiteS) 等。利用 SMSH 数据，Martin 等人[50]在小麦哲伦云附近找到了 1 个卫星星系；Drlica-Wagner 等人[51]利用 MagLiteS 数据，在大麦哲伦云附近找到 1 个卫星星系，并且该星系有可能被引力束缚于大麦哲伦云。之后，MagLiteS 项目又陆续发现了 2 个新的卫星星系[52, 53]。2020 年，DECam Local Volume Exploration survey (DELVE) 项目团队也发现了 1 个卫星星系[54]。

2.4 Gaia卫星星系搜寻

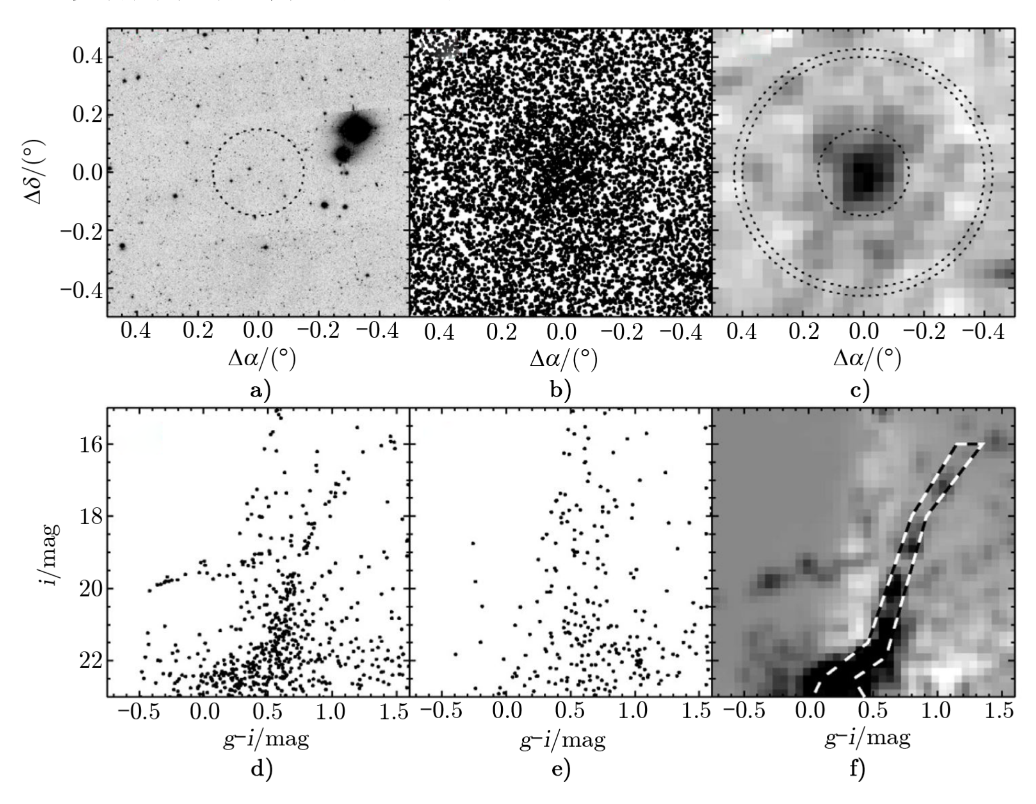
目前，已发现的卫星星系大都是位于中高银纬区域 (见图 2)。这是因为低银纬区域中不仅银河系盘恒星密度很高，而且尘埃消光严重，因此仅利用多波段测光数据，很难把卫星星系的信号提取出来。2016 年以来，Gaia 数据的出现一定程度上改善了这个问题，Gaia[55]是欧洲航空局发射的一颗卫星，计划对 10 亿颗太阳系周边恒星的自行、位置、温度等参数进行测量。利用 Gaia 的恒星自行测量，有助于扣除银河系恒星的污染。2019 年，Torrealba 等人[27]利用 Gaia 数据，在银道面附近发现一个极低面亮度的卫星星系 Antlia 2。最近，Darragh-Ford 等人[56]利用小波分析方法，结合 Gaia DR2 数据系统搜寻卫星星系。他们提供了一批可能的目标源，便于天文学家进行后续研究。

3 卫星星系搜寻方法

除了大小麦哲伦云等少数几个比较大的卫星星系肉眼可见之外，绝大多数在光学图像上都无法直接证认。目前搜寻卫星星系的方法，主要是基于这些星系的恒星空间聚集特性以及颜色-星等图所体现出异于前景河内恒星的特征 (如显著的红巨星支和蓝水平支等)。但是，卫星星系距离银河系几十到几百 kpc，而且它们的光度不大，因此可以空间分辨的亮恒星不多。如何同时从空间位置和颜色-星等图上把卫星星系的信号提取出来，是搜寻工作需要解决的主要问题。下面介绍文献中常用到的一种搜寻方法。

在早期的 SDSS 研究工作中，搜寻卫星星系的方法比较简单直接。通常的做法是：(1) 将亮于某一给定视星等的恒星选取出来，根据它们的空间分布分割成一系列方格，方格边长一般设为 $0.5' \sim 3'$。(2) 对每一个方格，计算其恒星面密度，然后与背景恒星面密度对比，检查是否有显著超出。背景恒星面密度为该方格周围 1 平方度左右天区内所有方格恒星面密度的平均值。超出最显著的一些方格会被挑出来，跟已知星团或卫星星系的位置做匹配，未匹配上的方格视为新卫星星系初步候选者。(3) 初步候选者的位置确认下来之后，将

该区域内的恒星颜色-星等图画出来，与背景区域恒星的颜色-星等图做比较，肉眼检查是否有超出背景的主序恒星支、红巨星支或蓝水平支。如果有，再与星族合成模型给出的颜色-星等图进行对比，根据最佳拟合的模型来限制该候选者的距离模数。一个典型的例子如图 4 所示。通常，在候选者挑选出来之后，会用其他望远镜做更深曝光的后随图像观测或光谱观测，进一步确认其是否是真正的卫星星系。



注：a) 卫星星系周围 1° × 1° 天区的图像，圆环半径为 0.15°；b) 恒星的空间分布；c) 将恒星分布平滑化之后的灰度图；d) 0.15° 中心圆圈区域内恒星的颜色-星等图；e) 半径为 0.4° ∼ 0.45° 圆环区域内的恒星颜色-星等图；f) 内圆圈和外圆环相减后的颜色-星等图，可以看到中心区域相对背景有显著的红巨星支和蓝水平支超出。

图 4 一个卫星星系搜寻例子[68]

这种搜寻方法十分简单易行，早期 SDSS 天区的卫星星系大多是这样被发现的[31−33, 68]。然而，该方法有一些明显缺点。首先，由于没有对恒星进行预筛选，尽可能排除掉银河系内的前景恒星污染，因此该方法受投影效应影响比较严重，很多恒星聚集度很高的区域实际上是由河内恒星投影效应造成，并非真正的卫星星系信号。其次，此方法对背景扣除的处理过于简单。可以想象，如果将一个卫星星系放在更远的距离上，那它可观测的亮星数目会减少，其信号相对于背景的显著度也会相应降低；因此，在进行背景扣除时，需将距离因素考虑进去，才能找到更多的卫星星系候选者。

最近几年，天文学家已经针对以上提到的两个问题对搜寻方法进行了改进。由于卫星星系的星族往往比较年老且贫金属，所以现在会先引入特定颜色判据以扣除掉银河系内相

对富金属的盘恒星。然后，针对不同的距离模数，再设置不同的颜色- 星等图过滤窗口，将处于此窗口外的恒星进一步排除掉，这样剩下来的恒星才有可能是该特定距离处卫星星系的成员恒星。最近几年的卫星星系搜寻 (如 DES 和 HSC-SSP)，都是基于这种改进之后的方法[36, 37, 48, 49]。

除了图像测光数据，有研究者尝试利用 Gaia 数据进行卫星星系搜寻。在 Torrealba 等人[27]的工作中，他们首先选取一些距离已知的 RR Lyrae 型变星作为中心恒星，然后检查该中心恒星与其周围恒星在自行参数空间上是否有明显的聚团结构 (clustering)。选 RR Lyrae 型变星作为中心恒星的原因是这类恒星贫金属且年老，与卫星星系的星族性质类似，同时它们的距离比较容易估算。在某一个中心恒星周围，如果探测到自行空间的聚团结构，说明这团恒星极可能隶属于同一个恒星系统，且距离与该中心恒星一致。该方法的优点是比较容易定出距离，而且可以应用于银盘面附近的矮星系搜寻。由于 Gaia 数据的极限星等是 20 mag，相对较浅，如果卫星星系不含有亮于 20 mag 的 RR Lyrae 型变星，则很难应用该方法。

4 卫星星系物理性质

卫星星系是已知最小的星系，对其物理性质的研究能为理解星系形成与演化的完整物理图像提供重要观测约束。随着卫星星系样本的增多，人们对它们的性质也有了越来越多的认识。以下对卫星星系的物理性质做介绍。

4.1 尺寸

相比光度相近的球状星团，卫星星系的尺寸要大一到两个量级，半光半径的分布范围为几十到上千 pc，见图 5。因此，尺寸-光度图也作为区分卫星星系和球状星团的一个重要判据。但是，球状星团和卫星星系在尺寸-光度图上的分布也并非完全分离，仍然有重叠区域。对于重叠区域内的源，如果没有其他判据加以区分，仍然很难确认它们是否是真正的卫星星系。另外，与大星系类似，卫星星系的尺寸与光度呈现显著的正相关性[2]。

4.2 光度函数

卫星星系光度函数表征其光度分布情况。在 SDSS 之前，经典卫星星系的样本大小和完备度都不足以详细研究光度函数。2008 年，将经典卫星星系与 SDSS 新发现的相结合，通过完备度改正之后，Koposov 等人[69]首次系统研究了卫星星系的光度函数。他们发现在暗端，光度函数有变平趋势。另外，观测到的光度函数与数值模拟预言的形状不太符合。同年，Tollerud 等人[70] 的研究则认为，亮端观测到的光度函数与数值模拟给出的结果相一致，但是暗端比数值模拟的少很多。他们预计未来的大规模巡天还会找到几百颗暗的卫星星系。2018 年，利用 SDSS+DES 的数据，Newton 等人[34]利用新的方法来估算卫星星系光度函数。他们的研究认为，银河系应该有 125 个左右 $M_V < 0$ mag 的卫星星系，如图 6 所示。这个数目比 Tollerud 等人之前的结果减少了很多，但是更加可靠，因为当时 Tollerud 等人的工作仅用了 SDSS DR5 的数据，覆盖的天区还不是很大，因此做完备度改正时存在较大

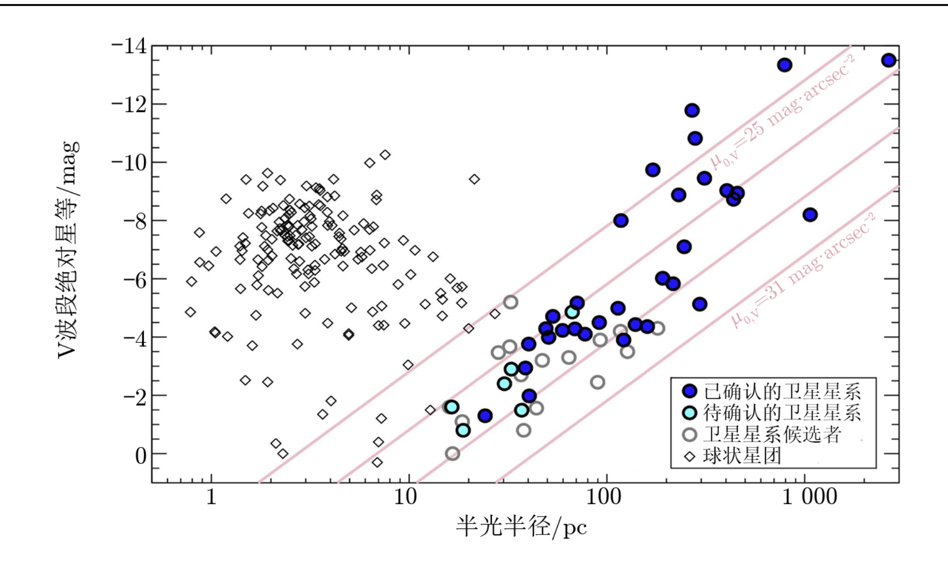


图 5　球状星团与卫星星系的尺寸-光度图[3]

的不确定度。通过与考虑了重子物质物理的流体动力学数值模拟做比较，Wetzel 等人[71]研究发现，在亮端 ($M_V < -6$ mag)，卫星星系的光度函数 (质量函数) 与数值模拟的结果吻合非常好，并不存在“失踪的卫星星系问题”。

4.3　初始质量函数

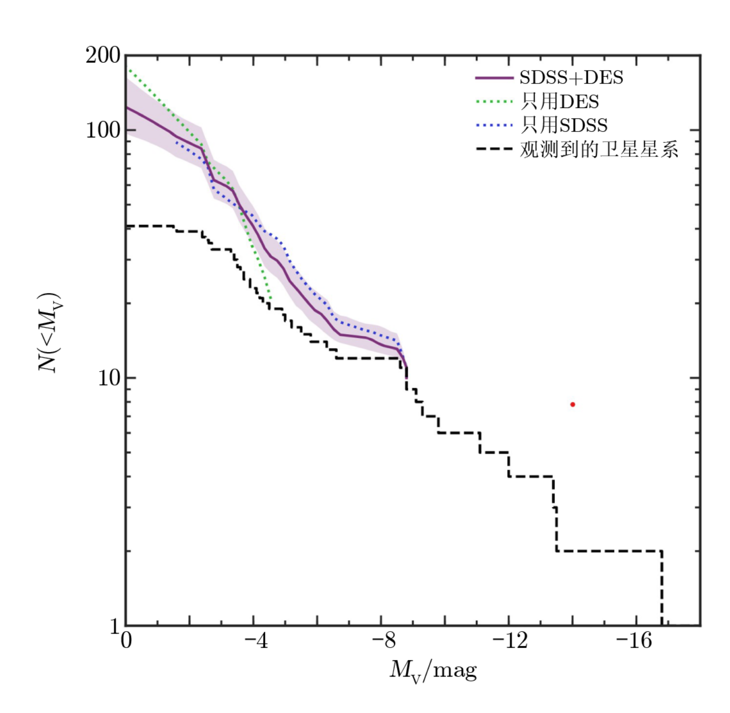
初始质量函数 (initial mass function, IMF) 描述同一批次诞生恒星的质量分布情况，在星系物理研究中有广泛应用[72, 73]。IMF 通常用指数形式来表示，即

$$\mathrm{d}N/\mathrm{d}M \propto M^{-\alpha}, \tag{1}$$

其中，N 表征恒星数目，M 表征恒星质量。关于银河系星团和场恒星的研究发现，IMF 指数为 $\alpha = 2.35$，与恒星所处环境关系不大[73]。利用哈勃太空望远镜高分辨率的图像，可以对卫星星系不同质量的恒星做计数，从而得到它们的 IMF，并与银河系做对比研究。Geha 等人[74]发现，Hercules 和 Leo 的 IMF 在小质量端的指数 α 分别为 1.16 和 1.31，比银河系的指数 2.35 要小不少，如图 7 所示。Kalirai 等人[75]研究了小麦哲伦云的 IMF，得到 $\alpha = 1.90$，同样也小于银河系的值。Gennaro 等人[76]进一步扩大样本，研究了 6 个卫星星系的 IMF，发现 α 的范围为 $1.01 \sim 1.87$，与银河系亦存在显著差异。另外，Gennaro 等人发现，金属丰度越高的星系，α 值越大，暗示金属丰度也会在一定程度上影响和调节恒星形成，与一些研究者的发现一致[77, 78]。

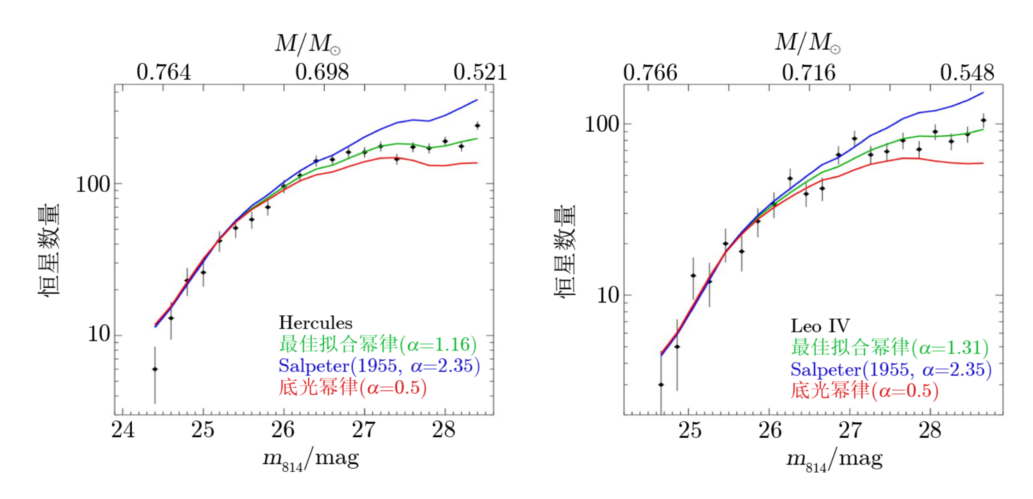
4.4　恒星速度弥散

恒星速度弥散对理解卫星星系的质量构成至关重要。利用高分辨率光谱观测，Kleyna 等人[15]第一次对卫星星系做了恒星速度弥散测量。他们对 UMa I 的恒星速度弥散测量结果为 $\sigma = 9.3^{+11.7}_{-1.2}\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$。假设 UMa I 仅含恒星而不含有暗物质，则其恒星速度弥散应为 $\sigma < 0.1\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$。该结果暗示着 UMa I 的质量由暗物质所主导。目前，已经有 20 多个卫星



注：黑虚线表征观测到的卫星星系累积光度函数结果；绿点线和蓝点线分别表征只用 DES 或者 SDSS 数据，经过完备度修正后得到的结果；紫线是利用 SDSS+DES 数据得到的结果，阴影区域代表 68% 置信度区间。

图 6　卫星星系累积光度函数[34]



注：在暗端，数据受到观测完备度和测光误差的影响很大。考虑了这些效应之后，暗端恒星计数并不符合完美的幂律形式，如图中彩色线所示。

图 7　两个卫星星系的 IMF[74]

星系有了速度弥散测量，得到的速度弥散分布范围为 $3 \sim 10\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$[2, 3]。

将卫星星系的恒星速度弥散换算成动力学质量，需要做一系列假设。其中，最重要的假设是这个系统必须是处于动力学迟豫状态。目前，有一些卫星星系 (特别是离银河系距离小于 40 kpc 的星系) 存在潮汐作用特征，可能并不满足动力学迟豫条件。对于这些星系，速度弥散并不能很好示踪它们的动力学质量。

4.5　金属丰度

Kirby 等人[79]研究了 8 个卫星星系恒星的金属丰度分布，发现 $-3 < [\mathrm{Fe/H}] < -0.5$。通过将观测结果与模型预言进行比较，Kirby 等人发现简单的闭盒被动演化模型 (closed-box model) 很难解释观测，必须引入气体的吸积或外流。对于光度偏小的星系，气体吸积模型更能拟合观测；反之，对于光度偏大的星系，气体外流模型更适用。

基于 SDSS 近邻大样本星系的研究发现，星系金属丰度与恒星质量 (或者光度) 存在显著的正相关关系[80]。对于卫星星系，该相关性依然存在，如图 8 所示。利用光谱观测数据，Kirby 等人[81]拟合了卫星星系的金属丰度-光度关系，拟合结果为：

$$[\mathrm{Fe/H}] = (-1.68 \pm 0.03) + (0.29 \pm 0.02)\lg\left(\frac{L_{\mathrm{V}}}{10^6 L_{\odot}}\right) \quad , \tag{2}$$

弥散度为 $\sigma = 0.16$ dex。该紧密关系的存在，暗示着大部分卫星星系的恒星成分并未经历严重的潮汐剥离过程。潮汐剥离会降低星系的光度，而不改变星系的金属丰度。如果潮汐剥离很严重，则金属丰度-光度关系不会如此紧密。

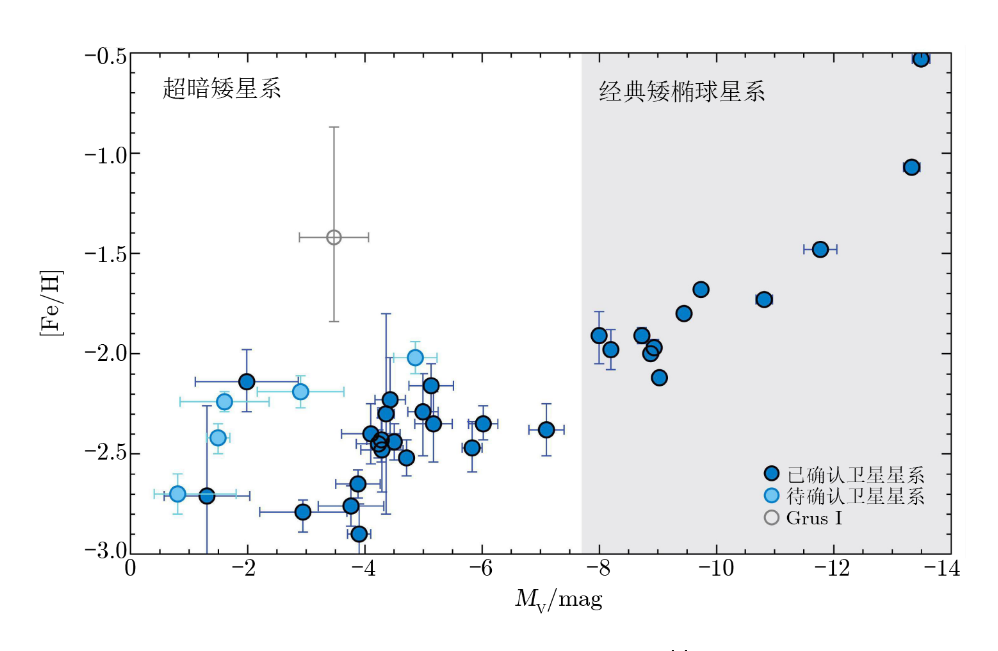


图 8　卫星星系金属丰度-光度图[3]

4.6 星族成分与气体

利用哈勃太空望远镜的高质量图像数据，可以分辨出卫星星系大量的恒星，从而对其颜色-星等图进行详细研究。通过与模型颜色-星等图进行比较，可以对它们的星族性质和恒星形成历史做出限制。Brown 等人[82]对 6 个卫星星系的研究表明，这些星系的星族相当年老，大部分的恒星在红移 $z \approx 6$ 左右形成；Weisz 等人[83]对 3 个卫星星系做了研究，发现它们的星族年龄老于 11 Ga，与 Brown 等人的结果一致。

目前，除了 LMC, SMC, Fornax, Scupltor, Leo T[84]之外，绝大多数都没有探测到中性氢气体[85, 86]。因为卫星星系大多是年老且缺乏恒星形成的星系，它们缺乏气体并不奇怪。目前，并不清楚是什么原因导致卫星星系失去气体。因为卫星星系位于银河系的暗物质晕内，一种可能的解释是它们遭受了银河系暗晕内热气体的冲压剥离 (ram-pressure stripping) 而失去了冷气体。这一猜想需要更多的工作来进一步确认。

5 基于下一代图像巡天的卫星星系搜寻

理论研究和对已有巡天完备性的分析都暗示还有许多卫星星系未被发现，HSC-SSP 的深曝光观测研究也支持这样的结论。未来要在卫星星系搜寻方面取得突破性进展，需要依赖下一代大规模图像巡天项目的推进。未来 10 年，在南半球主推的图像巡天设备是大型综合巡天望远镜 (the Large Synoptic Survey Telescope, LSST)。LSST 主镜口径 8.4 m，有效口径 6.4 m，比 SDSS 和 DES 所使用的望远镜要大许多。按照设计指标，LSST 单次曝光的图像深度就可以达到 $r = 24$ mag，10 年巡天图像叠加后的深度更是达到惊人的 $r = 27$ mag，观测范围为南半球 20 000 平方度的天区[87]。基于 LSST 的数据，预期能找到一大批更远或者更暗的卫星星系，在银河系位力半径内搜寻完备度可以达到 $M_{\rm V} = -2$ mag [3]。

早在 SDSS 时代，就有研究者对未来巡天项目的卫星星系搜寻能力做过估算。2008 年，Tollerud 等人[70]预计利用 DES 能找到 $19 \sim 37$ 个卫星星系；利用单次曝光的 LSST 数据，可以找到 $93 \sim 179$ 个卫星星系；如果利用 LSST 的叠加图像，则能找到 $145 \sim 283$ 个。之后的研究工作确实是在 DES 巡天里找到了 18 个卫星星系，与 Tollerud 等人的估算相吻合。尽管如此，Tollerud 等人可能还是高估了银河系卫星星系的总数目。在上文光度函数部分已提到，早期的数值模拟研究由于没考虑重子物质物理过程，因此生成过多的卫星星系。近期的研究表明银河系可能只含有 120 个左右 $M_{\rm V} < 0$ mag 的卫星星系 (见图 6)。

虽然 LSST 巡天能力强大，但是无法覆盖北天区。在北天区，正在建设当中的大视场巡天望远镜 (the Wide Field Survey Telescope, WFST) 计划进行下一代的光学时域巡天观测。WFST 是中国科学技术大学与紫金山天文台共建的 2.5 m 口径光学望远镜，拥有7平方度的大视场和超强的巡天能力，每晚观测 6 000 平方度天区，是搜寻卫星星系的利器。这架放在青海省冷湖观测基地的望远镜目前正在建设当中，预计于 2022 年 12 月完工，2023 年开始观测，6 a 巡天观测图像叠加后的深度为 $r = 25.1$ mag。WFST 叠加图像的深度与 DES 相当，但是巡天面积比 DES 大。按照 DES 的结果估算，利用 WFST 数据在北银冠附近

10 000 平方度天区内应该能找到 30 ~ 40 个卫星星系。考虑到 SDSS 等巡天在北天区已发现了 20 个左右的卫星星系，WFST 新发现数目预计为 10 ~ 20个。

中国在 2024 年左右将发射载人航天工程巡天空间望远镜 (简称 CSST)。CSST 巡天包括四个部分，其中的多色测光成像观测覆盖 17 500 平方度天区，r 波段观测深度达到 26 mag[88]，非常适合用来搜寻卫星星系。作为空间设备，CSST 拥有更好的视宁度，可以获得高质量的图像数据。利用 CSST 数据预计能找到一批新的卫星星系，同时分辨出这些星系里大量的恒星，便于进行后续研究。另外，欧洲和美国未来分别计划发射 EUCLID[89] 和 WFIRST[90] 卫星，在近红外波段进行大天区观测。因此，未来大规模图像巡天不仅有望大大提升卫星星系族群的普查完备度，高空间分辨率数据的加入可以在其恒星性质 (特别是小质量端) 的研究方面带来新的突破。

6 总 结

本文概括了近十几年来银河系卫星星系研究方面的相关进展，重点介绍了卫星星系的搜寻及其物理性质，并展望了未来的巡天项目对该领域的拓展。全文主要内容总结如下。

(1) 多波段、大天区图像巡天为卫星星系搜寻带来突破性进展，SDSS 和 DES 分别在北天区和南天区发挥了主要作用。更深的图像巡天项目 (如 HSC-SSP) 也发现了一些更暗或者更远的卫星星系，暗示着目前的卫星星系普查尚未完备。Gaia 数据的出现，为银道面附近的卫星星系搜寻带来新的机遇。截至 2021 年，一共发现卫星星系及候选者 60 余个。

(2) 大部分卫星星系的光度与球状星团相近，半光半径为几十到上千 pc，恒星速度弥散为 3 ~ 10 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。与大星系类似，其金属丰度和光度存在紧密的正相关关系，且质量由暗物质主导，IMF 暗端斜率比银河系要小。绝大多数的卫星星系星族年龄都十分年老，恒星主要形成于 $z=6$ 左右。它们的恒星形成活动已经熄灭，很难探测到冷气体成分。

(3) 未来 10 年，下一代大规模图像巡天将为卫星星系搜寻带来新的机遇。预计 LSST 能在南天区发现大量新的卫星星系，而 WFST 在北天区能新发现 10 ~ 20 个。空间设备 CSST, EUCLID, WFIRST 的高质量数据也将在卫星星系的搜寻和物理性质研究方面大放异彩。

参考文献：

[1] Klypin A, Zhao H, Somerville R S. MNRAS, 2002, 573: 597
[2] McConnachie A W. AJ, 2012, 144: 4
[3] Simon J D. ARA&A, 2019, 57: 375
[4] Watkins L L, Evans N W, An J H. MNRAS, 2010, 406: 264
[5] Callingham T M, Cautun M, Deason A J, et al. MNRAS, 2019, 484: 5453
[6] Fritz T K, Di Cintio A, Battaglia G, et al. MNRAS, 2020, 494: 5178
[7] White S D M, Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341

[8] Springel V, Wang J, Vogelsberger M, et al. MNRAS, 2008, 391: 1685
[9] Griffen B F, Ji A P, Dooley G A, et al. ApJ, 2016, 818: 10
[10] Klypin A, Kravtsov AV, Valenzuela O, et al. ApJ, 1999, 522: 82
[11] Moore B, Ghigna S, Governato F, et al. ApJL, 1999, 524: L19
[12] Bullock J S, Boylan-Kolchin M. ARA&A, 2017, 55: 343
[13] Boylan-Kolchin M, Bullock J S, Kaplinghat M. MNRAS, 2011, 415: L40
[14] Boylan-Kolchin M, Bullock J S, Kaplinghat M. MNRAS, 2012, 422: 1203
[15] Kleyna J T, Wilkinson M I, Evans N W, et al. ApJ, 2005, 630: L141
[16] Spekkens K, Mason B S, Aguirre J E, et al. ApJ, 2013, 773: 61
[17] Malyshev D, Neronov A, Eckert D. PhRvD, 2014, 90: 103506
[18] Nadler E O, Gluscevic V, Boddy K K, et al. ApJL, 2019, 878: L32
[19] Nadler E O, Drlica-Wagner A, Bechtol K, et al. PRL, 2021, 126: 091101
[20] Weisz D R, Boylan-Kolchin M. MNRAS, 2017, 469: L83
[21] Jeon M, Besla G, Bromm V. ApJ, 2017, 848: 85
[22] Mashchenko S, Wadsley J, Couchman H M P. Sci, 2008, 319: 174
[23] Wheeler C, Onorbe J, Bullock J S, et al. MNRAS, 2015, 453: 1305
[24] York D G, Adelman J, Anderson J E, et al. AJ, 2000, 120: 1579
[25] The Dark Energy Survey Collaboration, 2005, astro-ph/0510346
[26] Martin N F, Ibata R A, Chapman S C, et al. MNRAS, 2007, 380: 281
[27] Torrealba G, Belokurov V, Koposov S E, et al. MNRAS, 2019, 488: 2743
[28] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M, et al. AJ, 2002, 123: 485
[29] Willman B, Dalcanton J, Ivezić Ž, et al. AJ, 2002, 123: 848
[30] Willman B, Blanton M R, West A A, et al. ApJ, 2005, 129: 2692
[31] Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. ApJL, 2006, 643: L103
[32] Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. ApJL, 2006, 650: L41
[33] Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. ApJ, 2007, 654: 897
[34] Newton O, Cautun M, Jenkins A, et al. MNRAS, 2018, 479：2853
[35] Kirby E N, Boylan-Kolchin M, Cohen J G, et al. ApJ, 2013, 770: 16
[36] Bechtol K, Drlica-Wagner A, Balbinot E, et al. ApJ, 2015, 807: 50
[37] Drlica-Wagner A, Bechtol K, Rykoff E S, et al. ApJ, 2015, 813: 109
[38] Lynden-Bell D. MNRAS, 1976, 174: 695
[39] Deason A J, Wetzel A R, Garrison-Kimmel S. MNRAS, 2015, 453: 3568
[40] Jethwa P, Erkal D, Belokurov V. MNRAS, 2016, 461: 2212
[41] Walsh S M, Willman B, Jerjen H. AJ, 2009, 137: 450
[42] Kim D, Jerjen H. ApJ, 2015, 808: 39
[43] Luque E, Queiroz A, Santiago B, et al. MNRAS, 2016, 458: 603
[44] Laevens B P M, Martin N F, Bernard E J, et al. ApJ, 2019, 813: 44
[45] Torrealba G, Koposov S E, Belokurov V, et al. MNRAS, 2016a, 463: 712
[46] Torrealba G, Koposov S E, Belokurov V, et al. MNRAS, 2016b, 459: 2370
[47] Homma D, Chiba M, Okamoto S, et al. ApJ, 2016, 832: 21
[48] Homma D, Chiba M, Okamoto S, et al. PASJ, 2018, 70: S18
[49] Homma D, Chiba M, Komiyama Y, et al. PASJ, 2019, 71: 94
[50] Martin N F, Nidever D L, Besla G, et al. ApJL, 2015, 804: L5
[51] Drlica-Wagner A, Bechtol K, Allam S, et al. ApJL, 2016, 833: L5
[52] Koposov S E, Walker M G, Belokurov V, et al. MNRAS, 2018, 479: 5343
[53] Torrealba G, Belokurov V, Koposov S E, et al. MNRAS, 2019, 475: 5085
[54] Mau S, Cerny W, Pace A B, et al. ApJ, 2020, 890: 136
[55] Gaia C, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. A&A, 2016, 595: A1
[56] Darragh-Ford E, Nadler E O, McLaughlin S, et al. ApJ, 2021, 915: 48

[57] Munoz R R, Cote P, Santana F A, et al. ApJ, 2018, 860: 66
[58] Grillmair C J. ApJ, 2009, 693: 1118
[59] Carlin J L, Sand D J, Munoz R R, et al. AJ, 2017, 154: 267
[60] Luque E, Pieres A, Santiago B, et al. MNRAS, 2017, 468: 97
[61] Longeard N, Martin N, Starkenburg E, et al. MNRAS, 2018, 480: 2609
[62] Cerny W, Pace A B, Drlica-Wagner A, et al. 2021, astro-ph/2107.09080
[63] Kim D, Jerjen H, Geha M, et al. ApJ, 2016, 833: 16
[64] Makarov D, Prugniel P, Terekhova N, et al. A&A, 2014, 570: A13
[65] Mutlu-Pakdil B, Sand D J, Carlin J L, et al. ApJ, 2018, 863: 25
[66] Martinez-Vazquez C E, Monelli M, Bono G, et al. MNRAS, 2015, 454: 1509
[67] Graczyk D, Pietrzynski G, Thompson I B, et al. ApJ, 2014, 780: 59
[68] Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. ApJL, 2006, 647: L111
[69] Koposov S E, Belokurov V, Torrealba G, et al. ApJ, 2008, 686: 279
[70] Tollerud E J, Bullock J S, Strigari L E, et al. ApJ, 2008, 688：277
[71] Wetzel A R, Hopkins P F, Kim J hoon, et al. ApJL, 2016, 827: L23
[72] Salpeter E E. ApJ, 1955, 121: 161
[73] Bastian N, Covey K R, Meyer M R. ARA&A, 2010, 48: 339
[74] Geha M, Brown T M, Tumlinson J, et al. ApJ, 2013, 771: 29
[75] Kalirai J S, Anderson J, Dotter A, et al. ApJ, 2013, 763: 110
[76] Gennaro M, Tchernyshyov K, Brown T M, et al. ApJ, 2018, 855: 20
[77] Martin-Navarro I, Vazdekis A, La Barbera F, et al. ApJL, 2015, 806: L31
[78] Parikh T, Thomas D, Maraston C, et al. MNRAS, 2018, 477: 3954
[79] Kirby E N, Lanfranchi G A, Simon J D, et al. ApJ, 2011, 727: 78
[80] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. ApJ, 2004,613: 898
[81] Kirby E N, Cohen J G, Guhathakurta P, et al. ApJ, 2013b, 779: 102
[82] Brown T M, Tumlinson J, Geha M, et al. ApJ, 2014, 796: 91
[83] Weisz D R, Dolphin A E, Skillman E D, et al. ApJ, 2014, 789: 147
[84] Irwin M J, Belokurov V, Evans N W, et al. ApJ, 2007, 656: L13
[85] Spekkens K, Urbancic N, Mason B S, et al. ApJL, 2014, 795: L5
[86] Westmeier T, Staveley-Smith L, Calabretta M, et al. MNRAS, 2015, 453: 338
[87] Ivezic Z, Kahn S M, Tyson J A. ApJ, 2019, 873: 111
[88] Zhan H. Chinese Science Bulletin, 2021, 66: 1290
[89] Beaulieu J P, Bennett D P, Batista V, et al. Pathways Towards Habitable Planets, 2010, 430: 266
[90] Spergel D, Gehrels N, Baltay C, et al. 2015, astro-ph/1503.03757

Research Progress on the Searching of Satellite Galaxies of the Milky Way and Their Physical Properties

PAN Zhi-zheng[1,2], YANG Chao[1,2], FANG Min[1,2], ZHENG Xian-zhong[1,2]

(1. Department of Antarctic and Radio Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China; 2. School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Significant advances in the searching of Milky Way satellite galaxies have been

achieved in the past two decades, thanks to the large-area imaging surveys such as the SDSS and DES. Up to 2021, more than 60 Milky Way satellite galaxies are discovered, and this number is expected to increase with the advent of the next generation imaging surveys such as WFST and LSST. A complete census of Milky Way satellite galaxies is not only crucial for mapping the structure of the local Universe, but also puts observational constraints on galaxy formation models. Satellite galaxies are important constituents of the whole galaxy population, and the investigation of their physical properties is essential to understand the picture of galaxy formation and evolution. The processes on the searching of Milky Way satellites during the past two decades, the searching methods, and the studies on their physical properties are reviewed. It is now clear that the Milky Way satellite galaxies are mainly composed by old, metal poor stellar populations, and they follow the scaling relations extrapolated by the massive galaxies toward the low-mass regime. The potential of up-coming surveys on promoting the development of this domain is also discussed.

Key words: the Milky Way; dwarf galaxies; imaging surveys